第40卷　第10期
2023年10月

干 旱 区 研 究
ARID　ZONE　RESEARCH

Vol. 40　No. 10
Oct. 2023

石羊河下游民勤盆地土壤盐分空间分异特征

刘　新，　郝媛媛，　花立民

（甘肃农业大学草业学院，草业生态系统教育部重点实验室，国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心，
甘肃 兰州　730070）

摘　要：明晰土壤盐分空间变异性是土壤盐渍化程度研究和盐碱地改良的前提。本研究选取干旱内陆河流域石羊河下游民勤盆地为研究区，通过对0~30 cm土层土壤盐分原位数据统计学特征、空间自相关性、变异性和分布格局的分析，探讨民勤盆地土壤盐分空间异质性变化规律，以期为研究区土壤盐渍化治理提供理论依据。结果显示：（1）实测土壤盐分含量和变化范围均随土层加深而变小，且均呈偏正态分布。（2）Moran's I 指数均呈"∽"型波动趋势且值域范围随土层加深而变大，正（负）空间自相关性均随距离的增大而减小（0~10 cm负的空间自相关性相反）。（3）变异函数均以指数模型为最好，R^2随土层加深而变大（0.62→0.69→0.81），RSS均是0.0002，$C_0/(C_0+C)$和A_0变化规律一致，随着土层加深空间异质性由弱到强烈再到中等。（4）插值精度10~20 cm ＞ 20~30 cm ＞ 0~10 cm。3个土层土壤盐分均存在空间分异特性，水平方向（同一土层）上，盐渍化程度均自西南向东北逐渐增加；垂直方向（不同土层）上，分布规律由简单到复杂，从聚集状态（0~10 cm）逐渐趋于斑块化（10~20 cm）和斑点化（20~30 cm）。非盐化土（＜1.50%）和4种不同程度盐渍土在3个土层中均有分布，盐渍土面积中度（＞70.00%）＞强度（约20.00%）＞轻度（约9.00%）＞盐土（＜0.50%）。

关键词：土壤盐分；空间变异；地统计学；民勤盆地；石羊河下游

土壤盐渍化是自然环境和人类活动共同作用影响下的土壤退化现象，也是全球性的生态环境问题之一，不仅制约着农业经济的发展，也危害了生态环境的稳定性[1]。土壤盐分一般在表土层（0~30 cm）分布较为广泛[2]，其量化后可以表征盐渍化的进程，同时盐分在不同土层、方向的分布与移动导致了盐渍化的纷繁多变[3-4]。而在盐分运移过程中受母质、环境和生物等因素影响而具有空间异质性，并通过空间上斑块之间的差异来体现该性质，进而呈现出不同斑块之间的（自）相关性[5]。通过获取空间异质性与其自相关性有利于土壤资源的科学利用和明确盐渍化斑块对环境的影响。因此，通过量化土壤盐分来获取区域化的盐分数据，可以在不同区域中展示研究区内盐渍化的空间分布，并对土壤盐渍化动态监测具有重要意义。同时，细化表土层后，研究发现盐分受到结构因素和随机因素的综合影响，从而导致土壤盐分累积或散失量的差异[6-7]。通过对比不同土层之间的盐分变化可以掌握不同土层中盐分的差异，有助于更清楚地了解土壤盐渍化进程[8]。综上所述，结合土壤盐分量化和土层之间的空间分异特征可以更深入地理解盐渍化现象。

民勤盆地作为干旱区荒漠-绿洲生态系统的典型代表，风沙、盐渍和干旱使境内土壤盐渍化较严重[9]。现有研究多从地下水、地表水的水体矿化度出发[10]，到土壤盐分离子的变化[11]，以及不同植被群落的土壤盐分与养分的空间变化[12-13]，而缺乏对民勤盆地土壤盐分在空间上的系统分异研究。本文以土壤盐分量化为基础，辅以表土层不同层次之间的含量和区域差异，以此分析民勤盆地盐渍化程度分布变化与空间分异特征，以期为民勤盆地的土壤盐渍化变化提供基础数据，为生态恢复及土壤退化治理提供科学依据。

收稿日期：2023-03-08；　**修订日期**：2023-06-27
基金项目：国家自然科学青年基金项目（41907406）；甘肃农业大学科技创新基金项目(GAU-KYQD-2018-23)
作者简介：刘新(1997-)，男，硕士研究生，主要从事土壤恢复生态遥感工作. E-mail: liuixn74851686@163.com
通讯作者：郝媛媛. E-mail: haoyy@gsau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

民勤盆地(38°24′~39°15′N, 102°40′~103°55′ E)位于甘肃省武威市民勤县,处于石羊河流域下游且由腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠三面(除西面)包围(图1)。属温带大陆性干旱气候区,四季分明,干燥少雨多风,年均温7~8 ℃,风沙频发,年均风速2.7 $m\cdot s^{-1}$,降水量110 mm左右,年平均蒸发量2483 mm。作为流域的尾闾段,沙漠侵袭和咸水灌溉导致土壤沙化、盐化加剧。土壤类型主要是灰棕漠土、沙土和盐化土。植被以典型的沙生、旱生和盐生植物为主,白刺(*Nitraria* spp.)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和柽柳(*Tamarix chinensis*)是其主要的优势灌木。

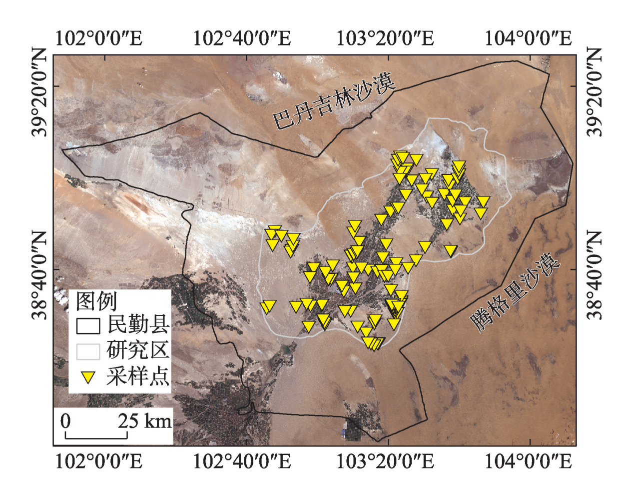


图1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 Location and distribution of sampling points in the study area

1.2 土壤盐分数据采集及测定

选取人为因素影响较小且植被分布相对均匀的区域,每个采样点以南北方向间隔100 m布设10 m×10 m样方,3个记为重复。样方内南北对角线取3个点的土样(深度为0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm)并分层混匀,四分法装袋后带回实验室备用。2020年(79个样点)和2021年(51个样点)共计130个采样点,经自然风干、拣去杂物、研磨过筛后取标准土样用于盐分测定。利用样品电导率及与烘干残渣法联合获取盐分含量[14]。参考《中国盐渍土》和《土壤农化分析》盐渍化类型划分指标对研究区土壤盐渍化进行分类分级(<2 $g\cdot kg^{-1}$非盐化土;2~3 $g\cdot kg^{-1}$轻度盐渍土;3~5 $g\cdot kg^{-1}$中度盐渍土;5~10 $g\cdot kg^{-1}$强度盐渍土;>10 $g\cdot kg^{-1}$盐渍土)[15-17],并评价盐渍化程度。

1.3 研究方法

1.3.1 正态性检验及方差分析 Kolmogorov-Smirnov检验(K-S检验)是一种常用的拟合优度检验方法[18],可根据样本数据推断其来自的总体是否服从某一特定理论分布,在5%置信水平下进行土壤盐分数据的正态分布检验,并根据P值大小得出结论[19]。单因素方差分析一般用于两个及以上样本平均数差别的显著性检验,用于研究某一个类型的自变量与另一个数值型的因变量之间的差异(5%)[11]。

1.3.2 空间自相关性 利用Moran's I指数展现土壤盐分的空间依赖性(自相关性),计算公式为:

$$\text{Moran's } I = n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2 \quad (1)$$

式中:n为需要估计的样点数目;x_i和x_j分别为变量x在样点i和j处的观测值;$\bar{x}$为x的平均值;W_{ij}为相邻权重。值域为[-1, 1],当I=0时,表示变量在此空间分布上无相关性,且呈随机分布;当I值趋于1时,变量之间的空间分布关系呈现完全正相关和聚集状态。反之,I值趋于-1时,变量呈完全负相关且分散分布。

1.3.3 空间异质性 利用半变异函数的拟合参数解析土壤盐分分布的空间异质性特征,并从随机性和结构性变异程度两个方面进行解释。选取块金值(Nugget, C_0)、基台值(Sill, C_i+C)、偏基台值(Partial Sill, C)和变程(Range, A_0)4个主要参数。C_0+C表示变量的总变异性,其中C_0表示随机因素引起的空间异质性,C表示结构(系统)因素引起的;二者之比C_0/(C_0+C),即基底效应展现由空间自相关的部分引发的空间变异程度;A_0表示变量具有空间相关性的阈值大小,即在阈值范围内该变量具有空间相关性,超出范围则独立无相关性[9, 20]。

1.3.4 Kriging插值 Kriging插值是地统计学中评估空间分布的一种方法,包含多种算法,常用的有普通Kriging、简单Kriging和泛Kriging [21]。本研究采用普通Kriging法对土壤盐分进行插值。公式[22]为:

$$S_0=\sum_{i=1}^{x}S_i\times W_i \quad (2)$$

式中:S_0为待估算盐分含量的样点;S_i为已知样点i的盐分含量;W_i为样点i的权重值;x为参与计算的

已知盐分含量样点的数量。

1.3.5 模型精度检验　为了保证预测值的无偏性，采用平均误差（Mean Error，ME）、平均标准误差（Mean Standardized Errors，MSE）、标准均方根预测误差（Root-Mean-Square Standardized Errors，RMS-SE）、均方根预测误差（Root-Mean-Square Prediction Error，RMSE）、平均标准误差（Average Standard Error，ASE）和决定系数（R^2）6个指标对Kriging插值结果进行精度检验。

1.4 数据分析

运用GS+9.0进行半变异函数模型筛选和Moran's *I*指数分析，Kriging插值以及空间分布图使用ArcGIS 10.3建模和绘制，利用Excel 2016进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 统计分析及正态性检验

研究区内土壤表层土上层（0~10 cm）、中层（10~20 cm）和下层（20~30 cm）的盐分含量呈逐渐递减的趋势，即随土层变深盐分含量均值逐渐减少（5.44 g·kg^{-1}→5.23 g·kg^{-1}→5.07 g·kg^{-1}），且盐分变化范围缩小（1.19~32.08 g·kg^{-1}→1.24~19.05 g·kg^{-1}→1.43~16.29 g·kg^{-1}）。同时，3个土层中土壤盐分含量的中位数均小于其均值，且标准差为3.50±0.38 g·kg^{-1}，说明50%以上的样点盐分含量在均值水平以下且离散程度较大。K-S正态性检验（95%置信区间）结果表明：0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm 3个土层土壤盐分经对数变换后的*P*值分别为0.2902、0.7952和0.5170，均＞0.05，呈偏态（偏度0.2076~0.8057）正态分布（图2）。方差分析结果表明，不同土层盐分无显著差异（*P*=0.164），因此可用地统计学法探索其空间分异特征。

2.2 空间自相关性

3个土层土壤盐分的Moran's *I*指数均呈"∽"型波动趋势（图3），即随着距离的增加，Moran's *I*指数在0值上下波动，且正空间自相关性大于负空间自相关性；值域分别为［－0.151, 0.302］、［－0.185, 0.392］和［−0.259, 0.552］，范围随土层加深而变大，空间自相关性和空间差异性均随土层加深而变大；除0~10 cm负的空间自相关性（随距离增大而增大）外，其他土层的正（负）空间自相关性均随距离的增大而减小。

2.3 空间异质性

通过对线性、球状、指数和高斯4种变异函数模

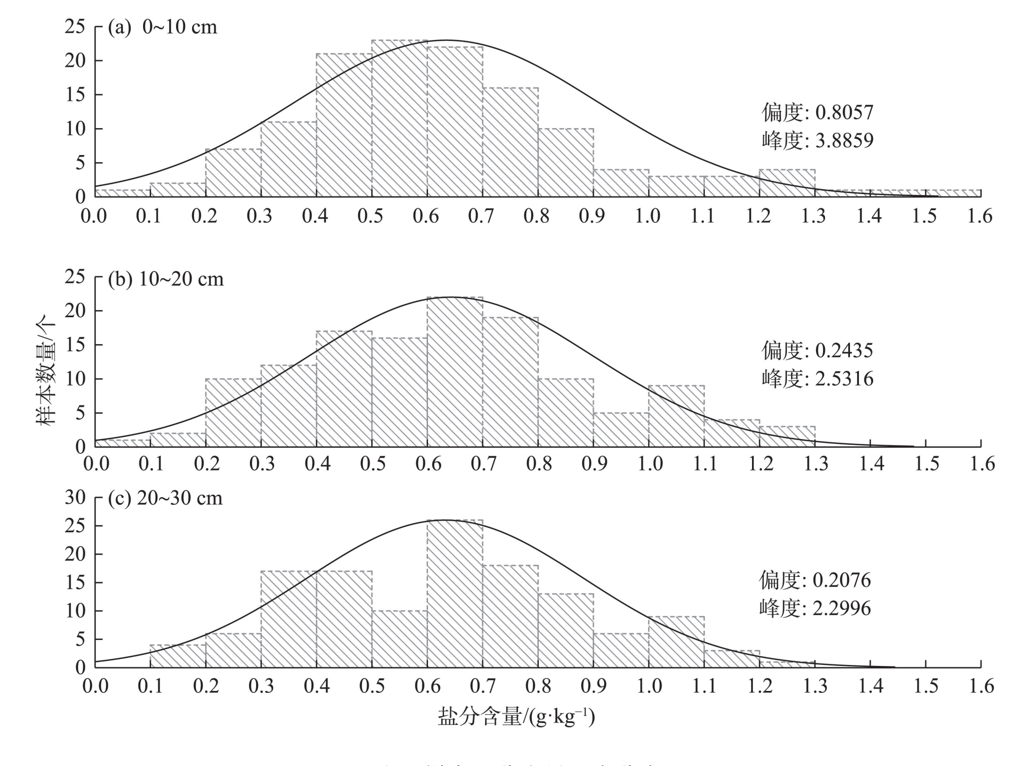


图2　样点盐分含量正态分布

Fig. 2　Normal distribution of salt content in samples

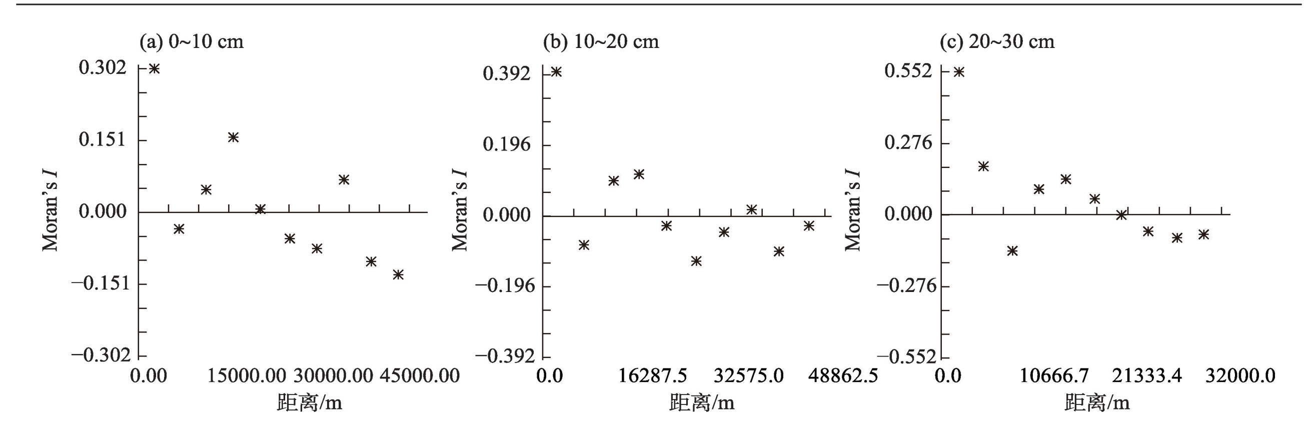


图3 土壤各层盐分Moran's *I*指数

Fig. 3 Moran's *I* index of soil salinity in each layer

型模拟的土壤盐分结果进行反复比较,筛选出最优半变异函数模型及其插值相关参数(表1)。3个土层均以指数模型为最优(R^2随土层加深而变大(0.62→0.69→0.81)),且RSS(残差)均是0.0002,说明3个土层的模拟结果均可以有效表征各土层土壤盐分的空间异质性。C_0(块金值)在0.008~0.060,是C的13.80%~66.67%,说明在模拟过程中随机因素得到了很好的控制,较为稳定而不影响模拟结果。$C_0/(C_0+C)$(基底效应)随土层加深由弱到强烈再到中等,说明盐分含量在不同土层中的空间异质性受随机性和结构性因素的影响不同。A_0(变程)的变化与$C_0/(C_0+C)$一致。其中,0~10 cm土层因受雨雪、风沙、践踏、垦殖等随机性因素的影响较大,而结构性因素的影响相对较弱,以致盐分含量变化较其余两层剧烈,空间异质性最弱且A_0最大。

2.4 空间分布格局

2.4.1 插值及精度验证 对插值结果(图4)进行精度验证(表2)可知,3个土层ME(平均误差)(−0.004~0.006)与MSE(平均标准误差)(−0.018~0.017)均趋近于0,筛选的变异模型满足对土壤盐分预测的准确性与有效性;ASE(平均标准误差)与RMSE(均方根预测误差)差值的绝对值均≤0.03,对变异程度的预测控制较稳定可信;RMSSE(标准均方根预测误差)均趋近于1,对变异程度的预测在合理范围内。因此,参数设置合理,插值精度均符合要求,且10~20 cm > 20~30 cm > 0~10 cm。

表1 土壤各层盐分的变异函数理论模型及相关参数

Tab. 1 Variogram theoretical model and related parameters of soil salinity in each layer

土层/cm	变异模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	基底效应 $C_0/(C_0+C)$	变程 A_0/km	决定系数 R^2	残差 RSS
0~10	指数模型	0.060	0.076	0.79	44.64	0.62	0.0002
10~20	指数模型	0.008	0.066	0.13	8.79	0.69	0.0002
20~30	指数模型	0.026	0.065	0.40	18.09	0.81	0.0002

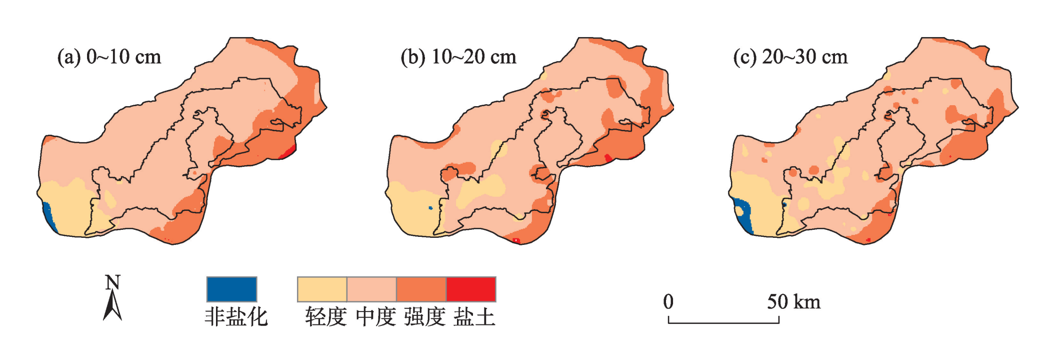


图4 不同土层的土壤盐分空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil salinity in different soil layers

表2　不同土层土壤盐分插值模型验证结果

Tab. 2　Verification results of interpolation model of soil salinity in different layers

土层/cm	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	标准均值误差 MSE	标准均方根误差 RMSSE	平均标准误差 ASE
0~10	−0.004	0.25	−0.018	1.13	0.22
10~20	0.001	0.22	0.002	0.98	0.23
20~30	0.006	0.21	0.017	1.03	0.21

2.4.2　空间分布特征　3个土层土壤盐分在空间分布上存在一定差异性(图4),非盐化土和4种不同程度盐渍土在3个土层中均有分布。水平方向上,盐渍化程度均自西南向东北逐渐增加,与石羊河流向一致;垂直方向的分布规律由简单到复杂,从聚集到分散。研究区98%以上区域为不同程度的盐渍土(表3),以中度盐渍土为主,面积均 > 70.00%且20~30 cm > 0~10 cm > 10~20 cm;强度盐渍土次之,主要分布在腾格里沙漠边缘(研究区东北-北-南沿线边缘)区域,面积随土层加深而减小(由0~10 cm的23.43%减少到20~30 cm的15.49%)且逐渐趋于斑块化;轻度盐渍土位列第三,主要分布于研究区西南毗邻武威盆地区域,随着土层加深研究区内部也逐渐出现斑块化分布区域,面积变化规律与强度盐渍土恰好相反(3.12%→12.20%→14.15%);盐土面积最小(< 0.40%)。非盐渍土主要分布在研究区西南部的盆地边缘,20~30 cm土层占1.27%,面积最大;0~10 cm土层次之,为20~30 cm土层的1/2;10~20 cm土层最小,仅占0.03%。

3　讨　论

3.1　采样点质量与盐分研究精度的关系

盐土的盐分组成与母岩的类型和成分有密切的联系,为了获取更具有代表性、典型性的样品,根据研究区的盐分状况、植被类型等确定优质的采样点[23]。采样点的确定需要结合实际,综合运用多种评价准则来分析获取。从采样点数量来看,以黄河三角洲为例,通过研究土壤盐分空间变异的变程指标确定出每1000 km^2需采集107个样点[24],而不同地点有着不同的样点分布数量标准;从采样点属性来看,不同的间距与协变量(生境、地表覆盖、利用方式等)的选择对区域盐分含量估算有影响[25];从处理方式来看,干燥与否、过筛大小、测定方法选取等不同的处理都会对盐分含量拟合模型精度有影响[23];从结果获取来看,拟合(数学归纳、统计建模等)与反演(卫星、雷达、无人机以及影像的光谱选取)都会给结果带来误差[26]。因此,在样品选取与采集过程中需要综合考量方法、协变量、处理、结果展现等的影响,才能使得研究更加准确并符合实际。

3.2　沙化对盐渍化程度空间异质性的影响

不同土层不同斑块表现出空间异质性[27]。盐渍化程度分布基本呈现灌区向四周加深的趋势,恰与两大沙漠侵袭民勤盆地的方向相反,土壤沙化程度可能对盐渍化程度有影响[28]。插值结果表明,靠近腾格里沙漠区域的盐渍化程度高于靠近巴丹吉林沙漠区域(图4),实测原位数据结果亦是如此(表4),原因在于巴丹吉林沙漠的侵袭程度要高于腾格里沙漠[29-30],在基于出入沙地、人员配置等因素考量设置腾格里沙漠边缘区域的采样点较多且分布广泛,而布设在巴丹吉林沙漠边缘区域的采样点相对较少且集中分布在沙漠边缘两端(图5),也会影响两大沙漠边缘区域土壤盐分的空间异质性。其潜在分布与实际情况之间复杂的变化与运移方式有待进一步研究[31]。

表3　不同土层的土壤盐分面积占比

Tab. 3　Proportion of soil salt area in different soil layers at different times

土层/cm	非盐土/%	轻度盐渍土/%	中度盐渍土/%	强度盐渍土/%	盐渍土/%
0~10	0.63	3.12	72.44	23.43	0.37
10~20	0.03	12.20	71.59	22.59	0.38
20~30	1.27	14.15	75.80	15.49	0.09

表4 沙漠边缘区域统计信息对比

Tab. 4 Comparison of statistical information of desert edge area

区域	采样点数	范围/(g·kg^{-1})	平均值/(g·kg^{-1})	标准差/(g·kg^{-1})	标准误差/(g·kg^{-1})	中位数/(g·kg^{-1})
巴丹吉林沙漠边缘区	22个	1.31~32.08	3.96	2.05	0.44	3.33
民勤盆地腹地	70个	1.29~23.18	4.86	3.77	0.49	3.82
腾格里沙漠边缘区	38个	1.18~8.89	7.76	6.85	1.11	5.70

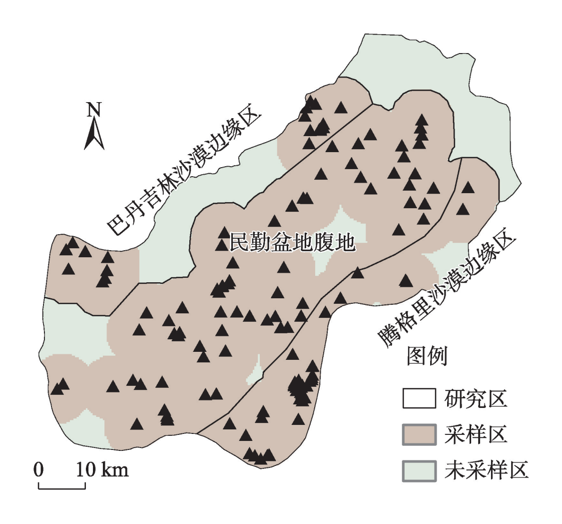


图5 沙漠边缘采样区域的对比

Fig. 5 Comparison of sampling areas at desert edge

3.3 民勤盆地盐渍化程度的变化趋势探究

民勤盆地是基于石羊河流域的农业垦殖区[32]。20世纪70年代以前，自然条件下的蒸发积盐是该地区土壤盐渍化的主要原因[33-34]；70年代之后，大量地下水开采灌溉引起的土壤盐分人为再分配加剧了该地区的次生盐渍化[35]。陈丽娟等[34]和顾梦鹤等[35]的研究发现，青土湖地区在石羊河流域综合治理生态恢复工程[36]中，初期(2010年)与中期(2016年)以强度盐渍土为主[34-35]，而本研究发现，工程结束后(2020—2021年)中度盐渍已达研究区的73.55%，说明近15 a来，研究区盐渍化程度有所改善，由强度逐渐向中度转换，间接表明了石羊河流域综合治理生态恢复工程对民勤盆地土壤盐渍化的恢复也具有一定效果。

3.4 空间异质性变化的探究

诸多学者对表层土壤的盐渍化程度变化提出了不同的思考。不同环境下，生物与非生物因素的互作关系是影响盐分分布或聚集多寡的关键因素[37-38]。民勤地区因所处环境限制，植被所延伸的丰富度[39]和生物量[40]等因素导致了不同土层变化程度的差异性；地下水[41]和土壤湿度[42]等水分条件又会从非生物的角度抑制或促进这些变化。不同的土层划分标准(间隔不同)也会对土壤盐分空间异质性的表达造成影响，综合多个土层的土壤剖面研究[43]与仅针对表土层甚至其他单一土层的结果不同且存在一定差距[44]。误差与样本量对于试验结果的影响是造成空间异质性差异的又一影响因素，包括方法选择、人为误差、数据累积和迭代程度以及系统变化等[45]。

4 结 论

通过筛选最优变异模型获取研究区土壤盐分的空间分布格局，表现不同土层盐分的空间差异，结论如下：

(1) 3个土层土壤盐分含量和变化范围均随土层加深而变小，且均呈偏正态分布；Moran's *I* 指数均呈"∽"型波动趋势，值域范围随土层加深而变大，空间自相关性均随距离的增大而减小。

(2) 土壤盐分的变异函数均以指数模型最佳，模拟结果均可有效表征各土层土壤盐分的空间异质性且随机性因素控制较为稳定；空间异质性随土层加深由弱到强烈再到中等，0~10 cm土层因受雨雪、风沙、践踏、垦殖等随机性因素的影响较大，空间异质性最弱且变程最大。

(3) 经交叉验证插值精度(10~20 cm > 20~30 cm > 0~10 cm)均符合要求。插值结果表明，3个土层土壤盐分均存在空间分异，水平方向(同一土层)上，盐渍化程度均自西南向东北逐渐增加，与石羊河走向一致；垂直方向(不同土层)上，分布规律由简单到复杂，从聚集状态(0~10 cm)逐渐趋于斑块化(10~20 cm)和斑点化(20~30 cm)。

(4) 非盐化土和4种不同程度盐渍土在0~30 cm土层中均有分布，以中度盐渍土为主(面积均 > 70.00%)；强度盐渍土次之，主要分布在腾格里沙漠边缘(研究区东北-北-南沿线边缘)区域，面积随土层加深而减小。

参考文献(References):

[1] 边慧芹, 王雪梅. 基于多光谱影像的干旱区绿洲耕层土壤盐分估算[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 110-118. [Bian Huiqin, Wang Xuemei. Estimation of soil salinity in cultivated layers of oasis in arid areas based on multispectral images[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 110-118.]

[2] 赵玉, 冯起, 李会亚. 黑河下游土壤盐分分布特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1196-1203. [Zhao Yu, Feng Qi, Li Huiya. Distribution characteristics of soil salts in the lower reaches of Heihe River, Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1196-1203.]

[3] 孙晓庆, 卞建民, 赵玉红, 等. 盐渍土水分下渗能力及水盐动态运移试验[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 12-17. [Sun Xiaoqing, Bian Jianmin, Zhao Yuhong, et al. An experimental study on water infiltration capacity and water-salt dynamic transport of saline soil[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(2): 12-17.]

[4] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83. [Yang Guang, Li Wanjing, Ren Futian, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 73-83.]

[5] 聂春. 内蒙古典型草地坡面土壤理化性质空间异质性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012. [Nie Chun. Spatial Heterogeneity of Soil Physical-Chemical Properties in Typical Crass Slope of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.]

[6] 时雷雷. 海南尖峰岭热带山地雨林原始林土壤理化性质空间异质性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012. [Shi Leilei. Study on the Spatial Heterogeneity of Soil Physical and Chemical Properties of Primary Tropical Montane Rainforest in Jianfengling, Hainan Island[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.]

[7] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 等. 象山港春、夏季大中型浮游动物空间异质性[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2308-2321. [Du Ping, Xu Xiaoqun, Liu Jinijn, et al. Spatial heterogeneity of macro-and meso-zooplankton in Xiangshan Bay in spring and summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2308-2321.]

[8] 严冬春, 文安邦, 鲍玉海, 等. 岩溶坡地土壤空间异质性的表述与调查方法——以贵州清镇市王家寨坡地为例[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 130-135. [Yan Dongcun, Wen Anbang, Bao Yuhai, et al. Expression and investigation methods of soil spatial heterogeneity in karst slope-as exemplified by Wangjiazhai slope in Qingzhen City, Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2008, 36(2): 130-135.]

[9] 郝媛媛. 基于GIS/RS的西北内陆河流域生态恢复效果评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Hao Yuanyuan. Evaluation of Ecological Restoration Effects Based on GIS/RS for Northwest Inland River Basin, China-A Case Study of Minqin Basin in the Downstream of Shiyang River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[10] 李军豪, 陈勇, 杨国靖, 等. 1975—2018年民勤绿洲沙漠化过程及其驱动机制[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 44-55. [Li Junhao, Chen Yong, Yang Guojing, et al. The aeolian desertification process and driving mechanism of Minqin Oasis from 1975 to 2018 [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 44-55.]

[11] 王新源, 陈翔舜, 丁乾平, 等. 不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应——以民勤荒漠绿洲过渡带为例[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1569-1580. [Wang Xinyuan, Chen Xiangshun, Ding Qianping, et al. Vegetation and soil environmental factor characteristics, and their relationship at different desertification stages: A case study in the Minqin desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1569-1580.]

[12] 王蕊. 甘肃民勤连古城国家级自然保护区荒漠植被群落及土壤特征初步分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. [Wang Rui. Preliminary Analysis of Desert Vegetation Community and Soil Properties in Liangucheng National Reserve in Minqin County, Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.]

[13] 滑永春, 李增元, 高志海. 2001年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 337-343. [Hua Yongcun, Li Zengyuan, Gao Zhihai. Variation of vegetation coverage in Minqin County since 2001[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 337-343.]

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 183-199. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 183-199.]

[15] 卢磊, 乔木, 周生斌, 等. 新疆渭干河流域土壤盐渍化及其驱动力分析[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(3): 357-361. [Lu Lei. Qiao Mu, Zhou Shengbin, et al. Analysis on characteristics and driver forces of soil salinization in Weigan River Basin, Xinjiang [J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(3): 357-361.]

[16] 乔木, 田长彦, 王新平, 等. 新疆灌区土壤盐渍化及改良治理模式[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2008. [Qiao Mu, Tian Changyan, Wang Xinping, et al. Soil Aalinization and Improvement Model in Xinjiang Irrigation District[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2008.]

[17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 131-133. [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei, et al. Saline Soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 131-133.]

[18] 陶金卫. 文山州年降水量统计特性分析[C]//云南省科学技术协会, 云南省水利学会2015年度学术年会. 北京: 中国会议, 2015: 693-697. [Tao Jinwei. Monte-carlo method and K-S test for reliability analysis of accumulation slopes' stability[C]//Yunnan Science and Technology Association, 2015 Annual meeting of Yunnan Water Conservancy Society, 2015 Annual meeting of Yunnan Water Conservancy Society. Beijing: China Conference & Ex-

hibition, 2015: 693-697.]

[19] 刘慧明, 王常明, 卢长伟, 等. 基于蒙特卡洛法和K-S检验法的堆积体边坡稳定性可靠度研究[C]//王思敬. 2017年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 工程地质学报, 2017: 442-447. [Liu Huiming, Wang Changming, Lu Changwei, et al. Monte-carlo method and K-S test for reliability analysis of accumulation slopes' stability[C] //Wang Sijin. Proceedings of the 2017 National Annual meeting of Engineering Geology. Beijing: Journal of Engineering Geology, 2017: 442-447.]

[20] 段凯祥. 嘉峪关草湖地区土壤水盐和养分的空间分布格局及其影响因素研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019. [Duan Kaixiang. Spatial Distribution Patterns of Soil Water, Salt and Nutrient Content in the Grass Lake Area of Jiayuguan City and Its Influencing Factors[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.]

[21] 周在明, 张光辉, 王金哲, 等. 环渤海低平原土壤盐化特征及基于DEM的Co-Kriging插值研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 70-73. [Zhou Zaiming, Zhang Guanghui, Wang Jinzhe, et al. Spatial variability of soil salinity and its estimation by Co-kriging based on dem in the low plain around the Bohai Sea[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8 (6): 70-73.]

[22] 黄利燕. 基于ArcGIS不同空间插值方法的降雨量预测效果对比[J]. 北京测绘, 2019, 33(7): 759-762. [Huang Liyan. A comparison of precipitation prediction effect based on different spatial interpolation methods in ArcGIS[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(7): 759-762.]

[23] 王海江, 蒋天池, A Yunger Jone, 等. 基于支持向量机的土壤主要盐分离子高光谱反演模型[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 263-270. [Wang Haijiang, Jiang Tianchi, A Yunger John, et al. Hyperspectral inverse model for soil salt ions based on support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 263-270.]

[24] 张晓光, 王志刚, 宋祥云, 等. 采样点数量对黄河三角洲垦利县土壤盐分空间变异的影响[J]. 资源科学, 2016, 38(12): 2375-2382. [Zhang Xiaoguang, Wang Zhigang, Song Xiangyun, et al. Effect of sampling on spatial variability in soil salinity in the Yellow River Delta Area[J]. Resources Science, 2016, 38(12): 2375-2382.]

[25] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于Kriging和Cokriging方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 321-327. [Fan Xiaomei, Liu Gaohuan, Liu Hongguang. Evaluating the spatial distribution of soil salinity in the Yellow River Delta based on Kriging and Cokriging methods[J]. Resources Science, 2014, 36 (2): 321-327.]

[26] 王海江, 张花玲, 任少亭, 等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 133-138. [Wang Haijiang, Zhang Hualing, Ren Shaoting, et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 133-138.]

[27] 康满萍, 赵成章, 白雪. 苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2282-2291. [Kang Manping, Zhao Chengzhang, Bai Xue. Spatial heterogeneity and influencing factors of total soil salinity in Sugan Lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2282-2291.]

[28] 曲文杰, 宋乃平, 杨新国. 扬黄灌区土壤质量早期变化的综合评价与分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 273-278. [Qu Wenjie, Song Naiping, Yang Xinguo. Assessment and analysis of early dynamic changes of cropland soil quality in Yanghuang irrigated area in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 273-278.]

[29] 丁建丽, 姚远, 王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4620-4631. [Ding Jianli, Yao Yuan, Wang Fei. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4620-4631.]

[30] 马康. 复垦村庄土壤重金属污染风险评估方法比较研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. [Ma Kang. A Comparative Study on the Risk Assessment Methods of Heavy Metal Pollution in Reclaimed Soil[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.]

[31] 丁建丽, 王飞. 干旱区大尺度土壤盐度信息环境建模——以新疆天山南北中低海拔冲积平原为例[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 64-78. [Ding Jianli, Wang Fei. Environmental modeling of large-scale soil salinity information in an arid region: A case study of the low and middle altitude alluvial plain North and South of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 64-78.]

[32] 郭承录, 李宗礼, 陈年来, 等. 石羊河流域下游民勤绿洲草地退化问题分析[J]. 草业学报, 2010, 19(6): 62-71. [Guo Chenglu, Li Zongli, Chen Nianlai, et al. The grassland degradation problems of the Minqin oasis, in the lower reaches of the Shiyang River Basin [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(6): 62-71.]

[33] 安富博, 丁峰. 甘肃省民勤县土地荒漠化的发展趋势及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 41-47. [An Fubo, Ding Feng. Development trend and control of land desertification in Minqin County of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 41-47.]

[34] 陈丽娟, 冯起, 成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 99-105. [Chen Lijuan, Feng Qi, Cheng Aifang. Spatial distribution of soil water and salt contents and reasons of saline soils' development in the Minqin Oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(11): 99-105.]

[35] 顾梦鹤, 李明红, 刘调平, 等. 民勤青土湖区不同土地利用类型土壤盐渍化特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 117-121. [Gu Menghe, Li Minghong, Liu Diaoping, et al. Soil salinization characteristics of different land-use types in the Qingtu Lake area of Minqin County[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, 57(1): 117-121.]

[36] 姜宛贝, 孙丹峰, 孙强强. 基于光谱混合分解的民勤生态治理效果评价[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 210−218. [Jiang Wanbei, Sun Danfeng, Sun Qiangqiang. Ecological restoration assessment in Minqin based on spectral mixture analysis[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 210−218.]

[37] 朱宏伟, 夏军, 曹国栋, 等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素[J]. 土壤, 2013, 45(2): 1339−1345. [Zhu Hongwei, Xia Jun, Cao Guodong, et al. Dynamic change of soil salinity in salinization abandoned farmland and affecting factors[J]. Soils, 2013, 45(2): 1339−1345.]

[38] 鲁力, 李升, 高远, 等. 渭−库绿洲土壤盐分空间分布及变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3): 136−142. [Lu Li, Li Sheng, Gao Yuan, et al. Spatial distribution and variation characteristics of soil salinity in the oasis of Weigan and Kuqa Rivers[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(3): 136−142.]

[39] 刘进辉, 王雪芹, 马洋, 等. 绿洲沙漠过渡带柽柳(*Tamarix ramosissima*)灌丛沙堆−丘间地系统土壤盐分含量特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 181−189. [Liu Jinhui, Wang Xueqin, Ma Yang, et al. Spatial variation of soil salinity on *Tamarix ramosissima* nebkhas and interdune in oasis-desert ecotone[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 181−189.]

[40] 苟芳珍, 赵成章, 杨俊仓, 等. 苏干湖湿地植被地上生物量空间格局及其对水盐的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7774−7784. [Gou Fangzhen, Zhao Chengzhang,Yang Juncang, et al. Spatial heterogeneity of above-ground biomass in Sugan Lake Wetland vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7774−7784.]

[41] 陈德文. 红崖山灌区土壤盐渍化程度分区研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. [Chen Dewen. Study on Division of Soil Salinization Degree in Hongyashan Irrigation District[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.]

[42] 赵鹏, 徐先英, 屈建军, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1496−1505. [Zhao Peng, Xu Xianying, Qu Jianjun, et al. Relationships between artificial *Haloxylon ammodendron* communities and soilwater factors in Minqin oasis-desert ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1496−1505.]

[43] 刘秀强, 陈喜, 张阳阳, 等. 青土湖土壤剖面盐分特征及其定量表述研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1174−1182. [Liu Xiuqiang, Chen Xi, Zhang Yangyang, et al. Study on salt distribution characteristics and mathematical expression of the soil profile in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1174−1182.]

[44] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区表层土壤盐分空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 136−141. [Li Huiya, Feng Qi, Chen Lijuan, et al. Spatial distribution characteristics of topsoil salinity in the Minqin oasis, Northwest China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(4): 136−141.]

[45] 李攻科, 王卫星, 曹淑萍, 等. 天津滨海土壤盐分离子相关性及采样密度研究[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 662−670. [Li Gongke, Wang Weixing, Cao Shuping, et al. Correlation of soil salt ions and sampling densities in Tianjin coastal area[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 662−670.]

Spatial differentiation characteristics of soil salinity in Minqin Basin, downstream of Shiyang River, China

LIU Xin, HAO Yuanyuan, HUA Limin

(College of Patacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control, National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Clarifying the spatial variability of soil salinity is the aim of soil salinization research and saline-alkali land improvements. In this study, the Minqin Basin in the lower reaches of the Shiyang River in the arid inland river basin was selected as the study area. By analyzing the statistical characteristics, spatial autocorrelation, variability, and distribution patterns of soil salinity in situ data of the 0−30 cm soil layer, the changes in the spatial heterogeneity of soil salinity could be explored to provide a theoretical basis for soil salinity in the study area. The measured soil salinity content and its variation range both decreased as the soil layer increased, and both were in a skewed normal distribution. Moran's *I* index showed a "∽" type fluctuation trend, and the range of values increased with the soil layer, and the positive (negative) spatial autocorrelation decreased as the distance increased (negative spatial autocorrelation of 0−10 cm was opposite). The exponential model was the most suitable for use with the variogram. The R^2 increased with soil depth (0.62→0.69→0.81), and the RSS was 0.0002. Variation rules of $C_0/(C_0+C)$ and A_0 were consistent, and the spatial heterogeneity ranged from weak to strong to moderate with soil depth. Accuracy of the interpolation was 10−20 cm > 20−30 cm > 0−10 cm. The soil salinity of the three layers had spatial differentiation characteristics, and the degree of salinization increased gradually from southwest to northeast in the horizontal direction (the same soil layer). In the vertical direction (different soil layers), the distribution patterns changed from simple to complex, and gradually tended to patches (10−20 cm) and spots (20−30 cm) from the aggregation state (0−10 cm). Nonsalinized soil (<1.50%) and four different levels of saline soil were distributed in the three soil layers, and the area of saline soil was moderate (>70.00%) > strength (approximately 20.00%) > mild (approximately 9.00%) > saline soil (<0.50 %).

Keywords: soil salinity; spatial variation; geostatistics; Minqin Basin; downstrearm of Shiyang River